

能量累积与均值漂移聚类结合的 红外小目标检测方法

赵晶晶 湛海新 刘星彤

(国防科学技术大学电子科学与工程学院, 长沙 410073)

摘要 研究红外图像中弱小目标的检测问题,提出了一种基于能量累积与均值漂移聚类的红外小目标检测方法。首先利用滑动窗口处理实现图像序列中目标能量积累,去除图像中的随机噪声,提高信噪比;然后选用不同尺度的核带宽对原始图像进行两次均值漂移聚类滤波,将两次滤波所得的图像灰度进行差分来实现背景抑制,提高目标与背景的对比如;之后根据图像的统计特性确定阈值,用门限分割方法提取目标区域,实现候选目标的准确定位;最后利用序列图像中目标运动的连续性和轨迹的一致性筛选出真正的目标。该算法通过选用不同尺度的核带宽进行聚类来得到目标及背景图像,背景抑制的同时也滤除了噪声。实验结果表明,该方法能快速有效地提取复杂背景条件下的红外小目标。

关键词 红外小目标检测 能量累积 均值漂移 差分 背景抑制

中图分类号:TP391 文献标识码:A 文章编号:1006-8961(2008)10-1878-04

Small Target Detection Based on Method Energy Accumulation and Mean Shift Clustering in Infrared Image

ZHAO Jing-jing, CHEN Hai-xin, LIU Xing-tong

(College of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073)

Abstract A new small target detection method for infrared image based on energy accumulation and mean shift clustering is presented. Firstly, accumulating the energy of the infrared image sequence in the sliding window with fixed size can remove the random noise in the infrared images to increase the SNR (signal to noise ratio). Secondly, we suppress the background by using the difference of adaptive mean shift filtering results with two different bandwidths. And thirdly, we segmenting the regions where there are possible targets and extract the statistical features. Finally filter the true targets according to the principle of moving continuity and trajectory consistency of moving target in the image sequences. Target image and background image can be obtained by use of different mean shift clustering, the noise can be excluded at the same time. The experimental results indicate that the method can effectively detect the small and weak targets under complex backgrounds.

Keywords infrared small target detection, energy accumulation, mean shift, difference, background suppressing

1 引言

红外制导技术在武器装备系统中有着广泛的应用,通过目标所产生的红外辐射来尽早地识别并锁

定跟踪目标,可以为武器装备争取足够的反应时间。然而,远距离摄取的红外图像一般信噪比较低,目标和背景的对比如较差,且目标边缘模糊,使得红外小目标的检测成为目标识别领域的一个难点。目前对小目标的检测一般是先在单帧图像中通过高通滤波

基金项目:武器装备预研基金项目(9140C8001020801)

收稿日期:2008-07-11;改回日期:2008-08-04

第一作者简介:赵晶晶(1983~),女。国防科技大学电路与系统专业硕士研究生。研究方向为红外目标检测与识别。

E-mail:wanningqx@126.com

或形态学滤波来得到候选目标,再利用序列图像中目标运动的连续性和轨迹的一致性筛选出真正的目标。但是在背景复杂、噪声干扰大的图像中进行高通滤波会得到大量的虚假目标点,为后续处理带来困难;形态学滤波的性能依赖于结构元素的选取,参数选择比较困难。近年出现的均值漂移 (Mean shift) 方法^[1,2]是一种有效的自适应滤波方式,其结果与带宽尺度的选择密切相关。

从红外小目标图像的特性出发,利用均值漂移聚类结果与带宽尺度的关系,提出了一种检测方法。首先设置一定大小的滑动窗口,对窗口内的图像序列进行能量积累,去除随机噪声;然后选取两种不同尺度的核带宽分别对原始图像进行均值漂移聚类滤波,利用滤波结果进行差分运算以实现背景抑制,找到可能的目标点,实现目标的粗定位;之后通过目标与背景的灰度差异提取目标,实现目标的精确定位;最后利用序列图像中目标运动的连续性和轨迹的一致性筛选出真正的目标。

2 基于能量累积的去噪方法

2.1 红外小目标图像的特点

远距离摄取的红外小目标图像主要由 3 个分量组成:小目标、天空背景以及噪声。其中小目标往往只有几个或十几个像素组成,亮度较高,与背景云层不相关,是图像中的孤立亮斑;天空背景从高到低是逐渐变亮的,除了因细小的云层干扰造成的局部灰度值变化较大外,灰度分布基本比较均匀,相关性强;噪声在灰度特性上表现为和小目标类似的高亮度,但在空间分布上不具有相关性。

远距离摄取的红外小目标的运动速度一般较慢,平均每帧的位移约一个像素,目标在连续的几帧图像中的位置变化相对较小,可以对图像序列直接进行能量累积,否则需要先对图像进行配准。

2.2 能量累积

对于信噪比较低,背景为高斯噪声的红外图像,进行多帧能量累积可以提高其信噪比。首先设定一个大小为 W 的滑动窗口,对相邻 W 帧的图像进行能量累积,以减弱噪声的影响。

能量累积的实质是通过图像进行平均处理来实现降噪的目的,同时图像中的原始部分(此处为小目标与背景)不会改变。在实验中,滑动窗口的大小并不是越大越好,窗口过大会使小目标面积扩大,导致目标定位准确度下降;反之,窗口过小,噪声

的消除效果又不理想,故窗口的选择需要综合考虑图像的质量与目标的运动速度。

3 基于均值漂移聚类的背景抑制

3.1 均值漂移聚类原理

均值漂移是一种统计聚类方法^[1,2]。通过将图像像素转化为同时包含图像灰度和结构信息的特征空间的样本点,对特征空间的样本点进行均值漂移聚类,实现对图像空间的操作^[3,4]。

给定 d 维欧氏空间 \mathbf{R}^d 中的 n 个样本, $\{\mathbf{x}_i, 1 \leq i \leq n\}$, 在点 \mathbf{x} 处利用核函数 $K(\mathbf{x})$ 以及正定的 $d \times d$ 带宽矩阵 \mathbf{H}_i , 定义点 \mathbf{x} 处的密度函数的核密度估计为^[4]

$$\begin{aligned} \hat{f}(\mathbf{x}) &= \sum_{i=1}^n \omega_i |\mathbf{H}_i|^{-\frac{1}{2}} K(\mathbf{H}_i^{-\frac{1}{2}}(\mathbf{x} - \mathbf{x}_i)) \\ &= \sum_{i=1}^n c_{k,d} \omega_i |\mathbf{H}_i|^{-\frac{1}{2}} k(\|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i\|_{\mathbf{H}_i}^2) \end{aligned} \quad (1)$$

ω_i 代表特征空间样本 \mathbf{x}_i 的权重,简记为 ω_i ; 核函数 $K(\mathbf{x})$ 表示样本 \mathbf{x}_i 与核中心点 \mathbf{x} 之间的相似性度量, $k(\mathbf{x})$ 是 $K(\mathbf{x})$ 的轮廓函数, $K(\mathbf{x}) = c_{k,d} k(\|\mathbf{x}\|^2)$, 常量 $c_{k,d} > 0$; 带宽矩阵 \mathbf{H}_i 表示核函数的影响范围。由于密度函数的梯度估计等于密度函数估计的梯度,故可推得:

$$\begin{aligned} \hat{\nabla} f(\mathbf{x}) &= \nabla \hat{f}(\mathbf{x}) \\ &= 2c_{k,d} \left(\sum_{i=1}^n \omega_i |\mathbf{H}_i|^{-\frac{1}{2}} \mathbf{H}_i^{-1} g(\|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i\|_{\mathbf{H}_i}^2) \right) \times \\ &\quad \left(\frac{\sum_{i=1}^n \omega_i |\mathbf{H}_i|^{-\frac{1}{2}} \mathbf{H}_i^{-1} g(\|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i\|_{\mathbf{H}_i}^2) \mathbf{x}_i}{\sum_{i=1}^n \omega_i |\mathbf{H}_i|^{-\frac{1}{2}} \mathbf{H}_i^{-1} g(\|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i\|_{\mathbf{H}_i}^2)} - \mathbf{x} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

式中, $\mathbf{g}(\mathbf{x}) = -k'(\mathbf{x})$ 。令:

$$m_{\mathbf{H}_i}(\mathbf{x}) = \frac{\sum_{i=1}^n \omega_i |\mathbf{H}_i|^{-\frac{1}{2}} \mathbf{H}_i^{-1} g(\|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i\|_{\mathbf{H}_i}^2) \mathbf{x}_i}{\sum_{i=1}^n \omega_i |\mathbf{H}_i|^{-\frac{1}{2}} \mathbf{H}_i^{-1} g(\|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i\|_{\mathbf{H}_i}^2)} \quad (3)$$

式(3)为均值漂移迭代公式。令:

$$M_{\mathbf{H}_i}(\mathbf{x}) = m_{\mathbf{H}_i}(\mathbf{x}) - \mathbf{x} \quad (4)$$

为均值漂移向量的表达式。将式(3)、式(4)分别代入式(2),得到:

$$\begin{aligned} \nabla \hat{f}(\mathbf{x}) &= 2c_{k,d} \left(\sum_{i=1}^n \omega_i |\mathbf{H}_i|^{-\frac{1}{2}} \mathbf{H}_i^{-1} g(\|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i\|_{\mathbf{H}_i}^2) \right) \times \\ &\quad (m_{\mathbf{H}_i}(\mathbf{x}) - \mathbf{x}) = 2c_{k,d} \left(\sum_{i=1}^n \omega_i |\mathbf{H}_i|^{-\frac{1}{2}} \mathbf{H}_i^{-1} \times \right. \end{aligned}$$

$$g(\|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i\|_{H_i}^2) M_{H_i}(\mathbf{x}) \quad (5)$$

轮廓函数集合中任意一个函数在应用中都能保证 $\sum_{i=1}^n w_i |\mathbf{H}_i|^{-\frac{1}{2}} \mathbf{H}_i^{-1} g(\|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i\|_{H_i}^2)$ 始终是正值^[4], 且由于梯度的方向始终指向函数值增大的方向, 故均值漂移向量总是指向密度增大的方向。当梯度为 0 时, 迭代终止, 收敛于局部密度极大值点处。

均值漂移聚类一般基于以下假设^[4]:

假设 1 特征空间各样本的权重相等, 即 $\omega_i = 1/n$;

假设 2 特征空间各样本独立同分布, 带宽矩阵与单位矩阵成正比, 即 $\mathbf{H}_i = h^2 \mathbf{I}$ 。

假设条件下的均值漂移迭代公式为

$$m_h(\mathbf{x}) = \frac{\sum_{i=1}^n g\left(\left\|\frac{\mathbf{x} - \mathbf{x}_i}{h}\right\|^2\right) \mathbf{x}_i}{\sum_{i=1}^n g\left(\left\|\frac{\mathbf{x} - \mathbf{x}_i}{h}\right\|^2\right)} \quad (6)$$

均值漂移聚类就是在选取好核函数并给定容许误差 ε 的条件下, 通过迭代得到 $m_h(\mathbf{x})$ 的收敛点, 从而找到局部的密度中心。

3.2 基于均值漂移聚类的自适应滤波

由于灰度空间和位置空间互相独立, 故多变量核函数可分解为两个空间核函数积的形式^[4]:

$$K_{h_s, h_r}(\mathbf{x}) = \frac{C}{h_s^2 h_r^p} k\left(\left\|\frac{\mathbf{x}^s}{h_s}\right\|^2\right) k\left(\left\|\frac{\mathbf{x}^r}{h_r}\right\|^2\right) \quad (7)$$

式中, $C > 0$; h_s, h_r 分别为核函数位置和灰度空间的带宽; \mathbf{x}^s 为特征空间中的位置分量, \mathbf{x}^r 为灰度分量; p 为灰度空间的维数。对任一点 \mathbf{x} , 迭代后收敛于密度中心 \mathbf{y}_j , 则均值漂移滤波的输出为点 $(\mathbf{x}^s, \mathbf{y}_j)$ 。

均值漂移聚类中所用到的带宽 h_s, h_r 的尺度大小决定了 \mathbf{x} 点处密度梯度值的估计将在多大的范围内进行, 带宽越大, 越多的图像细节会被忽略, 选择不同尺度的带宽进行聚类, 得到的结果也不同。

3.3 背景抑制的实现

针对红外小目标图像的特点, 提出一种背景抑制方法, 其工作流程如下:

(1) 选择与目标半径相差不大的小尺度灰度空间带宽 h_r 和位置空间带宽 h_s 对能量累积后的图像 \mathbf{I}_0 进行均值漂移滤波, 得到图像 \mathbf{I}_s 。由于目标灰度分布均匀, 故滤波后目标区域的像素聚为一类, 其灰度值更接近于目标本身的灰度; 背景区域则更加平滑, 云层的轮廓仍然清晰。

(2) 选择大尺度灰度空间带宽 h_r 和位置空间

带宽 h_s (大于目标半径) 对 \mathbf{I}_0 进行均值漂移滤波, 得到图像 \mathbf{I}_B 。目标与孤立的噪声块的面积很小, 在密度梯度估计中所占的比重比背景所占的比重小得多, 滤波后的结果接近于背景平滑后的灰度。

(3) 将两次滤波所得的图像进行差分, 得到背景抑制后的图像

$$\mathbf{I} = |\mathbf{I}_s - \mathbf{I}_B| \quad (8)$$

两次滤波所得结果中, 背景灰度变化较小, 差分后有效地被抵消, 而目标变化较大, 差分后得到了增强。同时, 该方法可以消除由于探测器电路干扰所引起的某些帧偏亮或偏暗造成的不利影响^[5]。

4 红外小目标检测算法

结合能量累积与均值漂移聚类思想, 提出了一种红外小目标检测算法。

(1) 设定滑动窗口, 利用能量累积的方法消除噪声, 提高信噪比。由于远距离摄取的红外小目标平均每帧的位移约一个像素, 故取 $W = 3$ 。

(2) 根据成像条件、目标大小选择不同尺度的灰度空间带宽和位置空间带宽对原图像进行两次均值漂移滤波, 将所得结果进行差分运算, 得到背景抑制后的图像。

(3) 背景抑制后的图像中, 大部分背景像素都集中在低灰度区, 只有目标和极少部分的噪声分布在高亮度区, 采用阈值法对其进行二值化处理。阈值表达式为

$$T = \mu + l\sigma \quad (9)$$

其中, μ 为图像的均值, σ 为图像的标准差, l 为通过实验数据确定的常数, 一般取 3 ~ 10。

(4) 得到候选目标序列图像之后, 根据目标运动的连续性和轨迹的一致性, 采用现有的成熟的方法, 如光流法、管道法、分层投票表决法等筛选出真正的小目标。

5 实验结果及分析

为了验证算法的效果, 选取一组具有典型代表性的红外小目标图像进行实验。图像大小为 212×131 , 如图 1 所示。取定 5×5 大小的局部窗口, 定义以下两个评价参数:

(1) 信噪比

$$SNR = \frac{f_{\max} - f_{\text{mean}}}{\sigma} \quad (10)$$

式中, f_{\max} 、 f_{mean} 、 σ 分别为局部窗口内目标最大灰度值、像素灰度均值, 以及像素灰度标准差。

(2) 背景抑制因子

$$BSF = \frac{mean_{in}}{mean_{out}} \quad (11)$$

式中, $mean_{in}$ 、 $mean_{out}$ 分别为处理前与处理后目标所在局部窗口内的像素灰度均值。

从图 1 中可以看出, 原始图像图 1(a) 中存在着云层干扰以及大量噪声, 目标很小且处于云层中, 图像的信噪比为 2.036dB; 能量累积后的图像图 1(b)

中杂波噪声被削弱; 由于远距离摄取的目标的成像面积一般不大于 5 个像素, 采用小尺度带宽 (h_s, h_r) = (2, 2) 进行均值漂移滤波后的图像图 1(c) 中, 脉冲噪声基本被滤除, 目标及背景云层的轮廓也得到了保持; 从大尺度带宽 (h_s, h_r) = (3, 4) 进行均值漂移滤波的结果图 1(d) 可以看出, 目标几乎淹没在背景中, 但云层背景的轮廓仍然得以保持; 利用二者的差值图像进行背景抑制, 可以使得目标与背景的对比如度增强, 得出背景抑制因子为 20.92; 检测后的结果图 1(e) 中的小目标很清晰, 轮廓很完整。采用传统方法检测出小目标的同时, 噪声点依然存在, 如图 1(f) 所示。

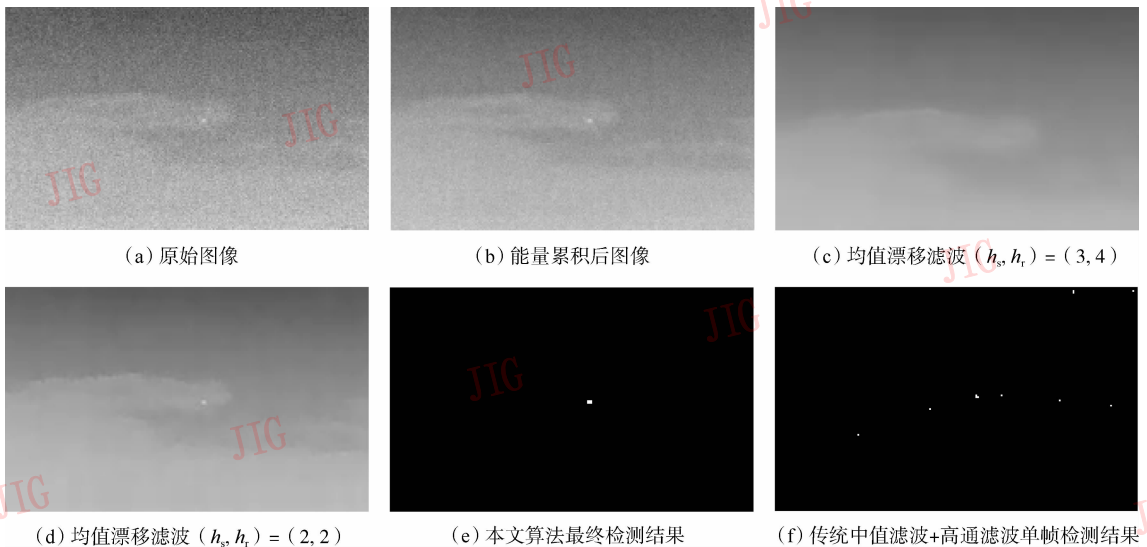


图 1 红外小目标检测结果

Fig. 1 The result of infrared small target detection

6 结 论

实验结果表明, 能量累积能削弱随机噪声的影响, 提高信噪比; 选取不同尺度的核带宽进行均值漂移聚类可以分别得到背景和背景图像, 进行差分可以有效地抑制背景以增强目标, 提高了目标检测算法的通用性和准确性。

参考文献 (References)

1 Keinosuke Fukunaga, Larry D Hostetler. The estimation of the gradient of a density function with application in pattern recognition [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1975, **21**(1): 32 ~ 40.

2 Cheng Yi-zong. Mean shift, mode seeking and clustering [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1995, **17**(8): 790 ~ 799.

3 Comaniciu D, Meer P. Mean shift analysis and applications [A]. In: Proceedings of the 17th IEEE International Conference on Computer Vision [C], Kerkyra, Greece, 1999, **2**: 1197 ~ 1203.

4 Comaniciu D, Meer P. Mean shift: A robust approach toward feature space analysis [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2002, **24**(5): 603 ~ 619.

5 Wu Wei, Peng Jia-xiong. The feature of small target and its invariance analysis in infrared image sequence [J]. Journal of Huazhong University of Science & Technology, 2002, **30**(3): 83 ~ 85. [吴巍, 彭嘉雄. 红外序列图像小目标的特征及不变性分析 [J]. 华中科技大学学报, 2002, **30**(3): 83 ~ 85.]